

Tuba Zoltán, Kardos Péter, Szabó Péter

AMDAR ADATOK LEHETSÉGES FELHASZNÁLÁSA A REPÜLÉSMETEOROLÓGIAI ELŐREJELZÉSBEN

A repülésmeteorológiai előrejelzési produktumok döntő többsége ultrarövid- vagy rövidtávú érvényességi idővel rendelkezik. Mivel a meteorológiai támogatás során alkalmazott hagyományos numerikus előrejelzési modellek jellemző frissítési gyakorisága 6–12 óra, ezért a köztes időszakokból származó mérési, megfigyelési adatok szerepe jelentősen felértékelődik az előrejelzési munkafolyamatokban. Különösen igaz ez a légkör magasabb rétegeiből származó mérési adatokra, amelyek eleve kiemelt fontosságúak a repülésmeteorológiában. Sajnos a hagyományos rádiószondás mérések sem térben, sem időben nem igazodnak a felhasználói igényekhez. A polgári légiközlekedésben rendelkezésre álló repülőgépes meteorológiai adattovábbító rendszer (AMDAR) adatainak alkalmazása ezért komoly előnyökkel járhat. Kutatásunkban ezen adatok felhasználási lehetőségeit vizsgáltuk meg. Ezzel párhuzamosan akusztikus radar (SODAR) adatokkal való összevetéssel ellenőriztük az AMDAR adatok pontosságát, megbízhatóságát. Megállapítottuk, hogy a mérési eljárásokból adódó korlátok figyelembe vételével az így nyert információ hatékony eszköz lehet a repülésmeteorológiai előrejelzések készítése és ellenőrzése során.

Kulcsszavak: repülésmeteorológia, AMDAR, SODAR/RASS, előrejelzés

BEVEZETÉS

Az információ értékét az élet minden területén annak aktualitása, elérhetősége és a felhasználók számára való hasznosíthatósága határozza meg. Nincs ez másként a meteorológia területén sem. A mérési, megfigyelési adatok az észlelés tárgyától, módjától és helyétől függő mértékben, de gyorsan elveszítik aktualitásukat. Ezért a meteorológiai támogatás során illetve az észlelési adatokat feldolgozó eljárásokban a felhasználói igényekhez igazított időbeli sűrűség, azaz az információ időszerűségének megőrzése kiemelt fontosságú. Az adatok elérhetőségének tekintetében hasonló a helyzet. Amennyiben a térbeli elérhetőség korlátozott, az is nagyban gátolja az információ teljes értékű felhasználását. Sajnos mindkét említett esetben negatív példaként hozhatók fel a hagyományos magaslégköri rádiószondás mérések. Az ilyen mérések sűrűsége ugyanis sem térben, sem pedig időben nem elégíti ki a felhasználói igényeket, amelyek teljesen jogosan a magaslégköri meteorológiai viszonyok kellő részletességű megismerésére irányulnak. Köztudott, hogy a légkör háromdimenziós szerkezetét jellemző adatok a meteorológia számos területén kiemelt fontossággal bírnak. A teljesség igénye nélkül ezek közül most csak a numerikus prognosztikában alkalmazott adatasszimilációt, a meteorológiai előrejelzéseket és a repülésmeteorológiai szakterületét említenénk. A fenti területeket érintő adatéhség enyhítése érdekében számos alternatív adatforrás irányába fordult az operatív meteorológusok figyelme. Ezeket az adatgyűjtés formája alapján két alapvető csoportba sorolhatjuk: *in situ* mérések és távérzékelés. Az *in situ* mérések közé tartoznak például a rádiószondás és repülőgépes észlelések, sőt napjainkban már a pilóta nélküli repülőeszközök alkalmazásának lehetőségét is számos kutatás vizsgálja, míg a távérzékeléshez sorolhatjuk többek között az akusztikus radarok és profilerek méréseit [1][2]. Ezek közül főleg az *in situ* mérési adatok kerülnek be a nemzetközi meteorológiai távközlési rendszerbe, így széles felhasználói kör számára csak ezek elérhetők

korlátozás nélkül. Az adatok időbeli gyakoriságának szempontjából vizsgálva az elérhetőség kérdését, egyértelmű, hogy a saját üzemeltetésű távérzékelési rendszerek időben folyamatos elérést képesek biztosítani. Ezzel szemben például a rádiószondás mérések a WMO¹ előírásaihoz igazodva csak 6, 12, sőt helyenként mindössze 24 óránként állnak rendelkezésre. A repülőgépes mérések időbeli gyakoriságát egy adott helyen erőteljesen befolyásolja a körzet repülőforgalma, de a közép-európai térségben ez alapvetően lényegesen jobb időbeli felbontást jelent, mint a rádiószondás mérések esetében. A horizontális elérhetőség szempontjából a repülőgépes mérések kivételével az elérhető technológiák pontszerű adatokat képesek biztosítani. Az AMDAR adatok esetében ez annyiban módosul, hogy a felszín közelében a repülőterek földrajzi helyzetének megfelelően szintén pontszerű az adatelérés, ami a szokásos repülési magasság eléréséig e pontok környezetében kúpszerűen kitágul. Repülési magasságon pedig a légi forgalomtól függő, de általában sűrű gridhez hasonló felbontás jellemző. Vertikálisan a legjobb felbontást és elérhetőséget a teljes troposzférára vonatkozóan a rádiószondás mérések biztosítják, amiktől nem sokkal maradnak el az AMDAR adatok sem, amelyek a WMO profilalkotási előírásainak megfelelően készülnek. Ezekkel szemben távérzékelési eljárások időjárási helyzettől és napszaktól függően általában csak a légkör alsó 300–3000 méteres tartományából gyűjtik az adataikat. A mért változók tekintetében a szél és a hőmérséklet mérése mindegyik eljárás esetén megoldott, ugyanakkor például nedvességi karakterisztikákat megbízható pontossággal csak a rádiószondák mérik és jelentik. A repülőgépes mérések esetén például a nedvességre vonatkozó információk továbbítása csak opcionális, hasonlóan az olyan speciális, a repülőgép egyéb rendszerei által előállított információk továbbítására is (pl. jégesedés, turbulencia), amelyek egyes felhasználási területeken (pl.: repülésmeteorológia) kifejezetten értékesek. Az európai térségben, ellentétben például az észak-amerikai térséggel, nem jellemző ezeknek a nem kötelező adatoknak a rutinszerű jelentése, továbbítása.

A fenti szempontokat összegezve megállapíthatjuk, hogy a hagyományos légköri szondázási adatok alternatívájaként általános meteorológiai célokra csak a hasonlóan korlátozás nélkül elérhető AMDAR adatok jöhetnek szóba. Lokálisan és speciális igények kielégítésére ugyan jó megoldást jelenthetnek a rendelkezésre álló távérzékelési rendszerek, ezek azonban magas telepítési költségigényük miatt sok felhasználó számára nem elérhetők. A korábban említett, a magasléggöri adatokat rutin jelleggel felhasználó szakterületek közül a fentiekben megfogalmazott gondolatok ellenére a hazai gyakorlatban az AMDAR adatoknak csak az adatasszimiláció területén történő felhasználása honosodott meg. Az ígéretes nemzetközi eredmények ellenére sem az előrejelzési, sem pedig a repülésmeteorológiai szakterületen nem képezi a napi rutin feladatok részét ezen adatok értékelése, analízise.

Cikkünk célja egyrészt annak bemutatása, hogy ezek az információk a nemzetközi szakirodalmi vonatkozások és esettanulmányok figyelembe vételével hogyan illeszthetők a hazai előrejelzési gyakorlatba. Másrészt a különböző forrásból származó nem felszíni adatok összehasonlító elemzésével az AMDAR adatforrások előnyeit és hátrányait szeretnénk megvilágítani és az adatok megbízhatóságát igazolni.

¹ WMO (World Meteorological Organization) – Meteorológiai Világszervezet

AMDAR

A repülőgépes meteorológiai adattovábbító rendszer, azaz az Aircraft Meteorological Data Relay system (AMDAR) története az 1970-es években kezdődött [3]. Létrehozásának célja a kereskedelmi repülőgépeken elhelyezett szenzorok segítségével meteorológiai mérési adatok gyűjtése volt, melyeket műholdas adatkapcsolaton vagy a repülőgép standard kommunikációs csatornáin keresztül juttatnak el a gyűjtőközpontokba, majd onnan a felhasználókhoz. A mérések eredményei jellemzően alfanumerikus táviratok (WMO Code FM 42-XI Ext) vagy újabban bináris adatformátumban (BUFR² – WMO Code FM 94) kerülnek bele a nemzetközi meteorológiai távközlési rendszerbe (GTS³). Maga a repülőgépes mérési folyamat diszkrét mérések sorozatából áll össze, melyek meghatározott időközönként vagy a repülés fel- és leszállási stádiumában adott nyomási lépcsővel készülnek. Egy-egy mérési ciklus lezárását követően a hazai tapasztalatok szerint a mérési sorozatot tartalmazó táviratok 3–5 percen belül jutnak el a végfelhasználóhoz, azaz szinte valós idejű az adatok elérése.

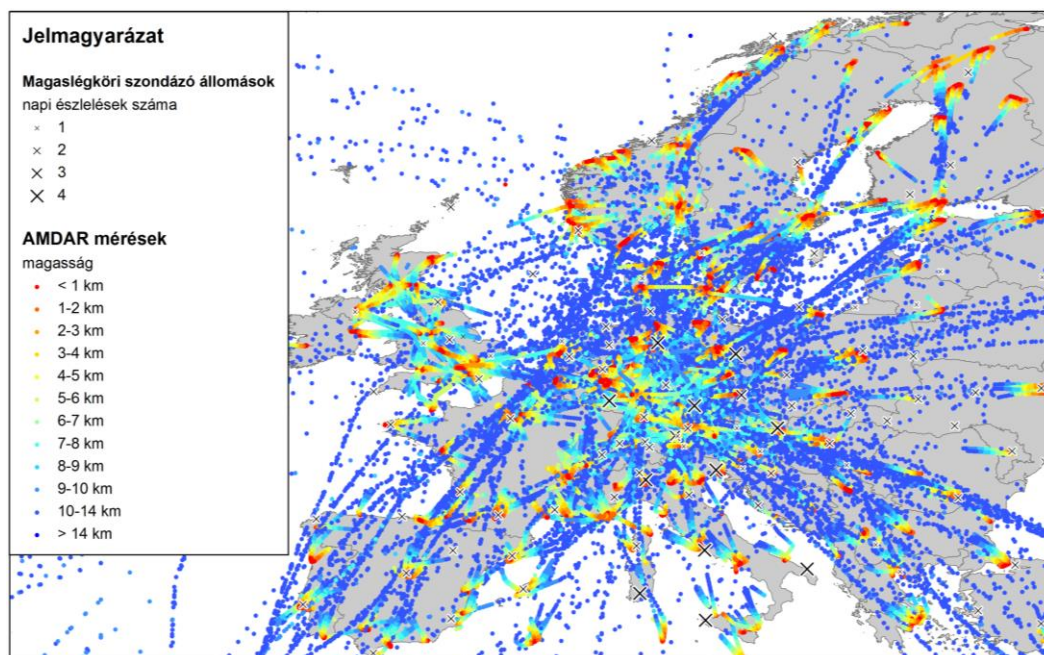
A kezdeti időszakban az AMDAR mérések száma még világviszonylatban is csak néhány ezer volt, ami az ezredforduló utánra dinamikus növekedéssel megszázszorozódott [4], napjainkban pedig a napi észlelések száma eléri a milliós nagyságrendet. Manapság már a legtöbb nagy légitársaság végez AMDAR méréseket, így a napi adatforgalom az európai térségben is százezres nagyságrendű egyedi mérést jelent (1. ábra). Az ábrán jól láthatók a nagy forgalmú repülőterek, amelyek közelében lényegesen több alacsonyabb magasságból származó mérési adat található, illetve jól azonosíthatók azok a jelentő légitársaságok által gyakran használt légifolyosók, ahonnan nagy mennyiségű felsőtroposzférikus mérés érkezik. Teljes troposzférikus vertikális profil azokon a területeken érhető el, ahol a pirostól-sötétkéig terjedő színskála teljes spektrumában látszik. Ezeken a helyeken a kirajzolódó spektrum egyben a mérési adatok földrajzi elhelyezkedését is reprezentálja. Ez az európai térség nagy részén jó átfedést mutat a magaslégköri szondázó állomások földrajzi helyzetével, ami alól talán csak a kelet-európai, kisebb légi forgalmú térség a kivétel. Ezen a területen az állomáshálózat sűrűbb lefedettséget mutat, mint az AMDAR mérések. A kontinens többi részén az AMDAR alapon elérhető vertikális profilok sűrűsége hasonló vagy jobb, mint a hagyományos szondázás esetén.

A térbeli eloszlás mellett az időbeli sűrűséget is érdemes vizsgálat alá vonnunk. Ahogyan az 1. ábrán is látható, a szondázások maximum négy alkalommal történnek naponta. Ez a darabszám azonban csak az összes állomás 10%-ra jellemző, míg napi két mérést az állomások 52%-a, mindössze egyet pedig 37%-a végez. Ezzel szemben a repülőgépes méréssel előálló profilok száma még egy nem túl nagy forgalmú repülőtéren is 8–10 darab naponta, míg a legforgalmasabb helyeken a napi 50 darabot is meghaladhatja. A mérések napon belüli eloszlását tekintve a szondás mérések közel 90%-át adó napi 1 vagy 2 mérést végző állomások döntő többsége a 00Z és a 12Z időpontokban tevékenykedik. Ez azt jelenti, hogy hagyományosan a 00Z-kor történő szondázások alkalmával érhető el a legteljesebb kép a légköri viszonyokról. Ezzel szemben a repülőgépes észlelések napon belüli eloszlása egészen más képet mutat. Mivel ezek a mérések

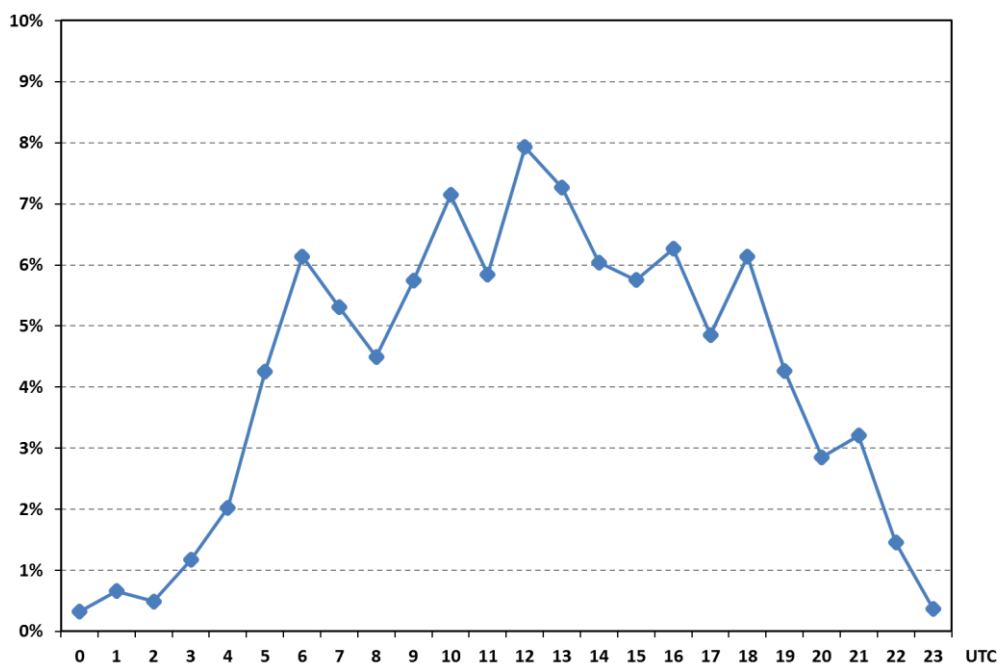
² BUFR (Binary Universal Form for the Representation of meteorological data) – tetszőleges meteorológiai információ kódolására alkalmas önleíró, bináris adattárolási formátum

³ GTS (Global Telecommunication System) – globális telekommunikációs hálózat a meteorológiai adatok továbbítására

a kereskedelmi repülések menetrendjéhez igazodnak, ezért az éjszakai órákban a legritkább az adatsűrűség. Viszont, ahogyan a 2. ábrán is látszik, a nap többi részében viszonylag kiegyensúlyozott a mérések órákra vetített relatív gyakorisága.



1. ábra Az európai térségben elérhető AMDAR mérési információk térbeli eloszlása 2016.02.28-án és az operatív magaslégköri szondázó állomások. A mérési pontokat jelölő színek azt mutatják, hogy az adott mérés melyik magassági rétegből származik, az állomások esetében pedig a szimbólum nagysága mutatja arányosan a napi észlelések számát



2. ábra Az európai térségben elérhető AMDAR mérési adatok adott órára vetített relatív gyakorisága 2016. március 13-án

A repülések során mért adatok tekintetében (lásd 1. táblázat) minden egyes egyedi mérés tartalmazza a repülőgép azonosítóját, a mérés pontos földrajzi koordinátáit és idejét, valamint az

aktuális repülési karakterisztikára vonatkozó információkat. A mérés vertikális helyzete nyomási magasságban (pressure altitude) van kódolva, amit a pitot cső által mért statikus nyomásból számítanak az ICAO standard légkör adatainak figyelembe vételével. Nyilvánvalóan ez a magasság érték csak abban az esetben egyezik meg a magasságmérőn kijelzett értékkel, ha azt éppen a standard légkör felszíni nyomási értékéhez (1013,25 hPa) állították be korábban. Ettől eltérő helyi nyomásértékek esetén a magassági értékeket korrigálni kell az aktuális nyomás szerint, amennyiben a mért adatokat a felszín feletti vagy a tengerszint feletti magasság függvényében kívánjuk ábrázolni.

Jelentett változó	Kötelező	Opcionális
Légijármű azonosító	×	
Repülési szakasz	×	
Földrajzi szélesség	×	
Földrajzi hosszúság	×	
Észlelés ideje	×	
Nyomási magasság	×	
Hőmérséklet	×	
Szélirány	×	
Szélsebesség	×	
Szélmaximum	×	
Emelkedési és elfordulási szög	×	
Nedvesség		×
Turbulencia		×
Jegesedés		×

1. táblázat Az AMDAR táviratokban jelentett kötelező és opcionális változók [3]

A meteorológiai változók közül csak a hőmérséklet és a szélre vonatkozó információk mérése és továbbítása kötelező érvényű, ezek minden AMDAR táviratban megtalálhatók. Ezzel szemben a nedvességi karakterisztikák észlelése és jelentése csak opcionális, ami az európai térségben sajnos azt jelenti, hogy ilyen adatok egyáltalán nem érhetők el a táviratokat feldolgozók számára. Nagyjából hasonló a helyzet a turbulencia és a jegesedés tekintetében is, amely változók pedig kiemelt fontosságúak lehetnének a repülésmeteorológiai felhasználásban.

Talán a fentiekben bemutatott korlátozó tényezők is közrejátszottak benne, de ahogyan a bevezetésben is említettük, az adatasszimiláció területe az egyetlen, ahol az AMDAR adatok rutinszerű alkalmazása nem csak nemzetközi [5][6], hanem hazai szinten [7][8] is bevett gyakorlattá vált. Ennek során a repülőgépes mérésekből származó meteorológiai információkat numerikus előrejelző modellek bemeneti paramétereiként használják fel. A nagyobb pontossággal megismert kezdeti feltételek pedig lehetővé teszik az előrejelzések bevalásának javítását.

Az AMDAR adatok előrejelzési munkafolyamatokban történő felhasználását azokon a területeken látjuk legindokoltabbnak és egyben leghasznosabbnak, ahol az előrejelzési kívánt folyamat nagyságrendje a szinoptikus skála alatt helyezkedik el és előrejelzési szempontból fontos a légkör vertikális viszonyainak pontos ismerete. Ezt nyilvánvalóan egyrészt arra alapozzuk, hogy a légköri szondázó állomások méréseit időben és térben is a szinoptikus skálájú folyamatok felderítéséhez igazították, tehát az ennél kisebb skálájú folyamatok detektálására csak korlátozottan alkalmasak. Másrészt az AMDAR mérések alapvető célja a nem felszíni légköri viszonyok feltérképezése, azaz ezek az adatok alapvetően a légkör vertikális tulajdonságaira vonatkozó információkat tartalmaznak. Ezek alapján repülésmeteorológiai szempontból két ki-

emelten fontos területet említhetünk, amelyekre teljesülnek a fenti kritériumok. Az egyik a konvektív folyamatok előrejelzése, ahol a légköri stabilitási viszonyok meghatározó paramétere a hőmérséklet vertikális rétegződése. A másik a téli félévben jellemző, tartósan inverziós helyzetek előrejelzése, ahol az inverziós réteg vastagságának, esetleg felszakadásának pontos prognóza nélkülözhetetlen az alacsony felhőalap és látástávolság előrejelzése szempontjából.

Ezek a területek azonban, ahogyan korábban is említettük, az évtizedes nemzetközi példák ellenére sincs hazai gyakorlata az AMDAR adatok felhasználásának. Számos külföldi konferencián [9][10] és publikációban [11] volt például téma a repülőgépes mérési adatok alkalmazásának elemzése a veszélyes konvektív folyamatok előrejelzésében. Ezek az adatok ugyanis időbeli felbontásukban képesek lehetnek a mezoskálájú változások észlelésére, ami a konvektív folyamatok jellemző nagyságrendje. A másik említett területen az adatok felhasználhatóságát erősen befolyásolja a nedvességi karakterisztikák hiánya, ugyanakkor a többi adat időbeli elérhetősége ezt némileg kompenzálhatja [12].

A fentiek alapján belátható, hogy az AMDAR mérések használata az operatív gyakorlatban gyakran komoly segítséget jelenthet a szakemberek számára. Ahhoz azonban, hogy ezek a mérések a rádiószondás észlelések teljes értékű alternatív adatforrásává válhassanak, mindenképpen szükséges lesz az európai térségben is a nedvességi viszonyokra vonatkozó mérések napi rutinba való bevezetése. Ezek nélkül ugyanis a magaslégköri viszonyok csak korlátozott mértékben ismerhetők meg, számos esetben megnehezítve ezzel a meteorológusok értékelő, elemző munkáját.

Figyelembe véve az AMDAR adatok feldolgozásából és felhasználásából származó előnyöket és az elérhető adatok mennyiségét, a Magyar Honvédség Geoinformációs Szolgálatánál kidolgozásra került egy a BUFR távirat alapon elérhető AMDAR adatokat feldolgozó és megjelenítő programcsomag. Ez a meteorológiai távközlési hálózaton keresztül érkező releváns adatokat megfelelő szűrés után adatbázisba helyezi, ahonnan adatbázis lekérdezések útján a felhasználói igényeknek megfelelő módon a szükséges adatokat megjeleníti. A rendszer jelenleg még fejlesztési, tesztelési szakaszban van, de – amint jelen cikk is bizonyítja, – kutatási célokra már alkalmazható és hamarosan operatív használatba is kerül. A későbbiekben bemutatott AMDAR adatok dekódolását és részben feldolgozását, megjelenítését is az imént említett szoftverrel végeztük.

SODAR/RASS

A SODAR a Sonic Detection and Ranging rövidítést takarja, amely magyarul hanghullámokkal történő érzékelést és távolságmérést jelent. A berendezés függőleges, illetve a függőlegeshez képest 22 és 29 fokos szögben álló hangnyalábok bocsát ki, és a mikroturbulenciákról visszaverődő hangot vizsgálja. A hangfrekvencia doppler eltolódásából számítani tudja az adott irányra vonatkozó sebességkomponenst, a visszaérkezési időkésléptetésből pedig a visszaverődés magasságát. Több irányban is elvégzi a mérést, és ebből tudja képezni a horizontális szélvektort. A függőleges hanghullám segítségével pedig a vertikális áramlási komponens közvetlenül is mérhető.

A berendezéshez lehetőség van RASS (Radioacoustic Sounding System) kiegészítő csatlakoztatására, amely a SODAR berendezéssel együttműködve tud folyamatos virtuális hőmérsékleti profilt mérni. A SODAR berendezés hangszórói által kialakított hullámfrontról visszaverődő elektromágneses hullámok segítségével a hangsebesség pontos terjedési sebességét tudja meghatározni.

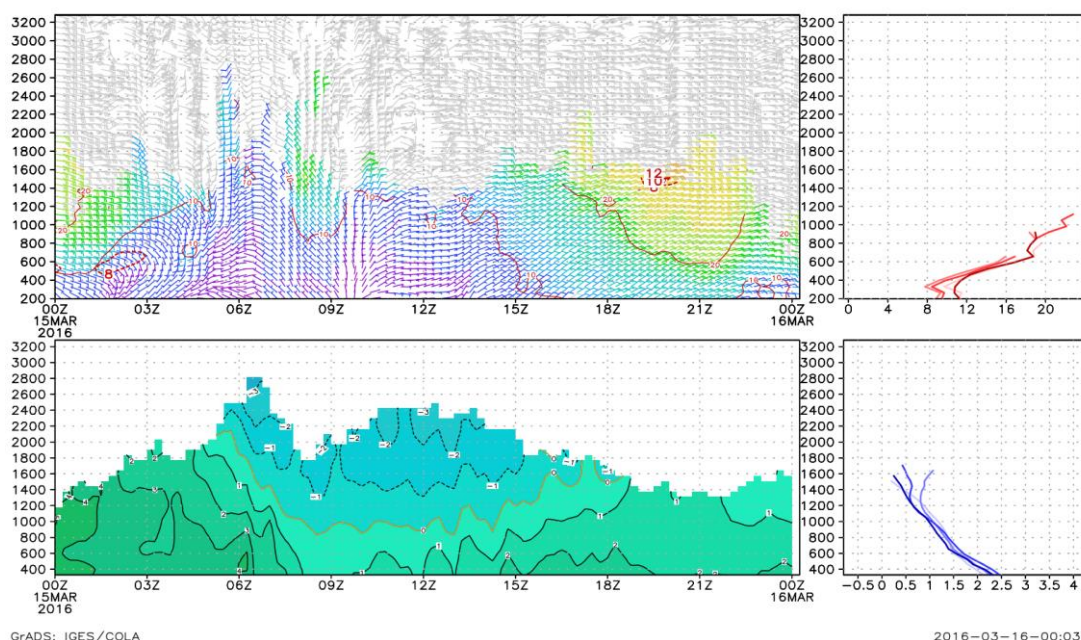
$$c_{hang} = \sqrt{\frac{c_p}{c_v} RT_v}, \text{ ahol } T_v = T(1 + 0,61r) \quad (1)$$

Ebben a T_v a virtuális hőmérséklet, T a levegő szenzibilis hőmérséklete. A RASS berendezés közvetlenül tehát a virtuális hőmérsékletet méri, ebből a keverési arány (r) ismeretében határozható meg a levegő hőmérséklete. A gyakorlatban azonban a feldolgozó szoftver egy közelítéssel dolgozik, amely során egy állandó, nagy nedvességtartalmú keverési aránnyal közelíti a hőmérsékletet. Miután (1) értelmében a virtuális hőmérséklet mindig magasabb, mint a száraz levegő hőmérséklete, ezért száraz levegő esetén a számított szenzibilis hőmérséklet értéke alacsonyabb lesz a valóságosnál.

Relatív nedvesség	Hőmérséklet	Virtuális hőmérséklet
0%	20 °C	20 °C
50%	20 °C	21,28 °C
100%	20 °C	22,55 °C

2. táblázat 20 °C-os hőmérséklet virtuális hőmérsékleti értéke különböző relatív nedvességi értékek esetén

A SODAR-ok alkalmazási területe nagyon széles skálán mozog. Tipikusan planetáris határréteg mérések és vizsgálatok, valamint a felszín közeli áramlási viszonyok utólagos, vagy valós idejű nyomon követésére alkalmazzák. Használják szélfarmok telepítése előtti mérésekhez, gáz-, vagy potenciális légszennyezési források közelében (erőművek, vegyi üzemek) körüli áramlások monitorozásához, és nem utolsósorban repülőtereken, a felszíntől néhány száz méteres magasságig bezárólag. A SODAR berendezések jellemző névleges mérési magassága 500–1000 m közötti, amely azonban erősen függ a légkör áramlási viszonyaitól, hidrosztatikai stabilitásától, illetve a mikroturbulenciák jelenlététől.



3. ábra A SODAR/RASS berendezés megjelenítő felülete. A vízszintes tengelyen az elmúlt órák látható, a legfrissebb adatok a diagram jobb szélén jelennek meg. Függőleges tengelyen a felszín feletti (AGL) magasság lábban mérve. A felső ábra a szelet (10 csomónként megjelenített izotacha vonalakkal), az alsó ábra a hőmérsékletet jeleníti meg. A jobboldali ábrák az elmúlt 4 mérés profiljait mutatják, a legélénkebb színű a legfrissebb mérés.

A Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi repülőtéren telepített berendezés egy Scintec XFAS típusú SODAR, amelyhez RASS bővítmény is csatlakozik. Az eszköz telepítése után a tesztmérések 2015. december 3-án kezdődtek meg. A berendezés 1000 m-es névleges magassággal mér, amelyhez a mérési ciklus hossza miatt minimum 30 perces átlagolási időszak tartozik. A berendezéshez szállított szoftver elvégzi a mérési adatok osztályozását is, amely során az irreális, vagy hibával terhelt adatok szűrése is megtörténik. A mérési adatokból az elmúlt 12 órára vonatkozó diagram készül, amely a 15 percként érkező adatokkal folyamatosan frissül.

A Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi repülőtéren működtetett SODAR/RASS berendezés operatíván szolgáltatott adatait a HungaroControl repülésmeteorológiai szolgálata a repülőtéri előrejelzésekhez, TREND típusú ultrarövid távú előrejelzéshez, szélnyírás riasztások kiadásához, valamint a légiforgalmi irányítás számára a futópályairány meghatározásához nélkülözhetetlen szélmező információk nyújtásához használja fel. Emellett az inverzió magasságának meghatározása, a csapadéktípus előrejelzése és helyes észlelése során is nagyon fontos kiegészítő információkat szolgáltat.

A tesztidőszak során megvizsgáltuk, hogy a berendezés számára nem túl kedvező téli, erősen inverziós időszakban a magasság függvényében milyen volt a szél- és hőmérsékleti adatok rendelkezésre állása.

Magasság	Szél	Hőmérséklet
300 m	95%	97%
500 m	70%	53%
700 m	42%	19%
900 m	2%	5%

3. táblázat A 2015. december 3 és 2016. február 28 közötti időszakban mért rendelkezésre állás

A 4. táblázatban foglaltuk össze az AMDAR és a SODAR/RASS mérésekkel kapcsolatos előnyöket és hátrányokat. Természetesen az alkalmazott mérési módszer függ a felhasználási céltól és az elérhető lehetőségektől.

	AMDAR	SODAR/RASS
Mérhető/jelenthető paraméterek	hőmérséklet, szélirány, szélesebség, relatív nedvesség, turbulencia, jegesedés ⁴	hőmérséklet, szélirány, szélesebség
Adatok időbeli elérhetősége	repülési forgalomtól függő	folyamatos
Adatok horizontális elérhetősége	repülési forgalom által lefedett területek	csak a telepítés helyén elérhető
Adatok vertikális felbontása	jellemzően 150-200 m	20 m ⁵
Adatok vertikális elérhetősége	repülőterek körzetében teljes troposzférikus profil, máshol a tipikus repülési szintek adatai	időjárási szituáció függvénye, de jellemzően 500 – 1000 m közötti
Mérések típusa	instant értékek	30 perces átlagértékek
Adatelérés költségigénye	a felhasználók számára általában ingyen elérhető	magas telepítési költségek

4. táblázat Az AMDAR és SODAR/RASS adatok különböző szempontok szerinti összehasonlítása

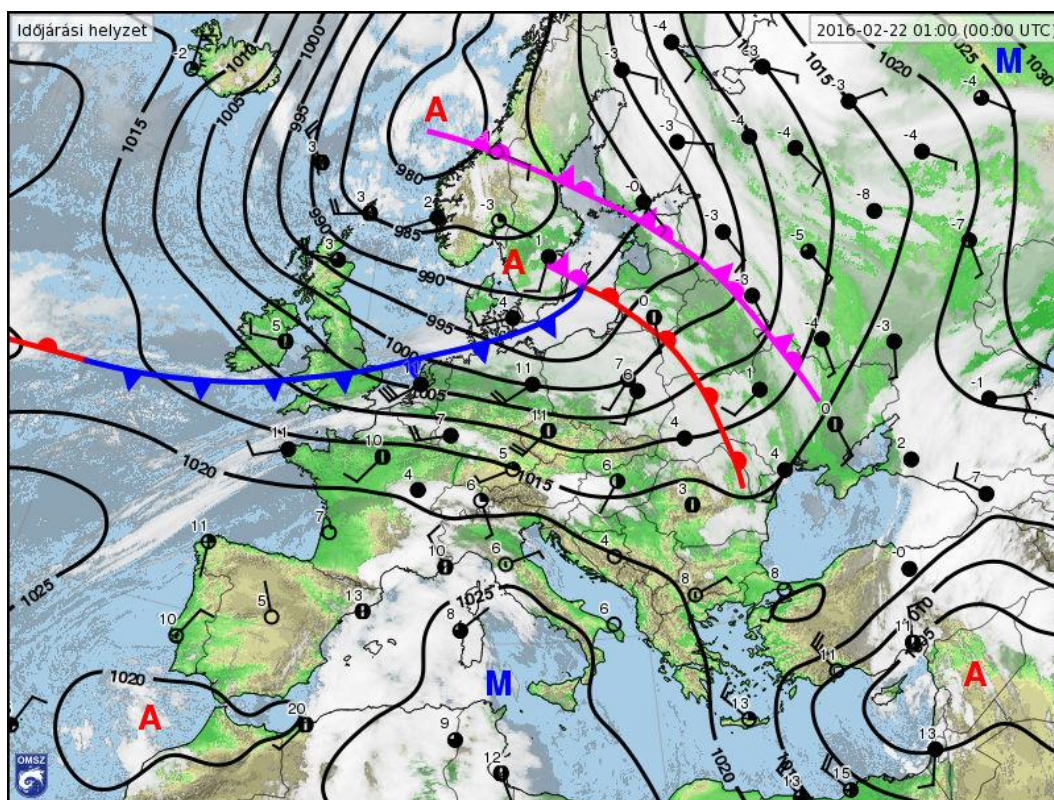
⁴ Az európai térségben továbbított táviratok gyakorlatilag nem tartalmaznak relatív nedvességre, turbulenciára és jegesedésre vonatkozó információkat.

⁵ A mérési magasság függvényében változó érték

Amint az a táblázatban is látható, a mért paraméterek tekintetében csak elméletben van különbség a két platform között, ugyanis az európai térségben továbbított táviratok gyakorlatilag nem tartalmaznak relatív nedvességre, turbulenciára és jegesedésre vonatkozó információkat. Repülőtéri alkalmazás esetén az adatok időbeli elérhetősége szempontjából a SODAR által szolgáltatott adatok gyakorlati haszna lényegesen jobb, hiszen a repülési feladat megkezdése esetén is rendelkezésre állnak az adatok. Ezzel szemben az AMDAR adatok csak a felszállási/leszállási művelet végrehajtását követően érkeznek meg, azaz az aktuális repülés biztosítására nem alkalmasak. A vertikális elérhetőség szempontjából a SODAR adatok jellemzően csak a légkör legsalsóbb rétegeiből állnak rendelkezésre, míg az AMDAR adatok segítségével akár teljes troposzférikus profil is előállítható. Az adatok vertikális felbontása a SODAR esetében lehetővé teszi például szélnyírás számítását is, viszont az AMDAR felbontása mellett ilyen paraméter pontosan nem számítható.

ESETTANULMÁNYOK, ADATFELDOLGOZÁS

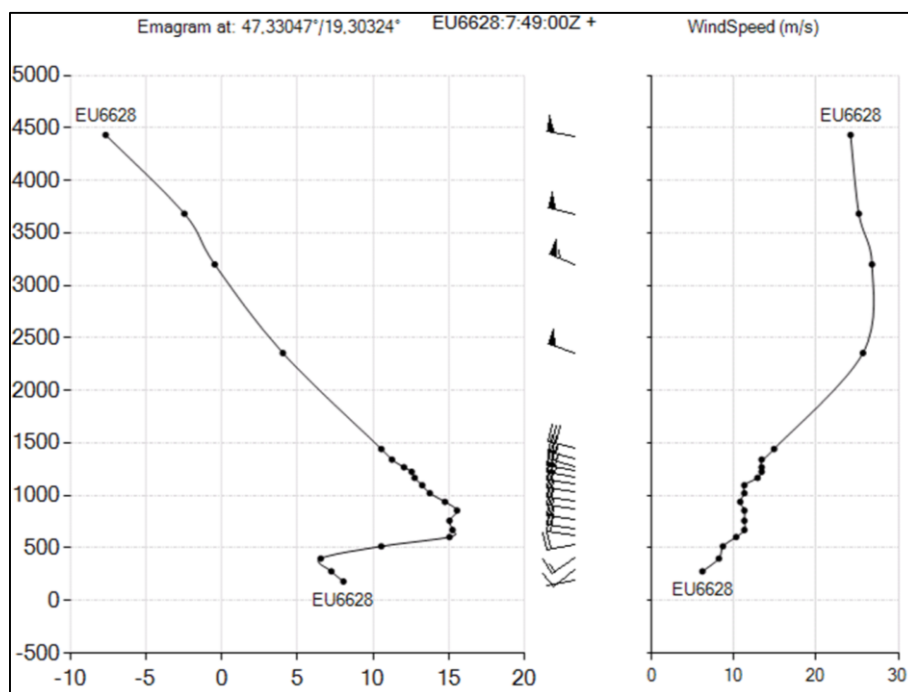
2016. február 22-én hazánk egy ciklon melegszektorának és egy a Földközi-tenger felett elhelyezkedő anticiklon északi peremének köztes áramlási rendszerében helyezkedett el (4. ábra). Ennek hatására nyugatról a magasabb rétegekben lényegesen enyhébb levegő érkezett térségünk fölé.



4. ábra Időjárási helyzetkép az európai térségben 2016. február 22-én (Forrás: www.met.hu)

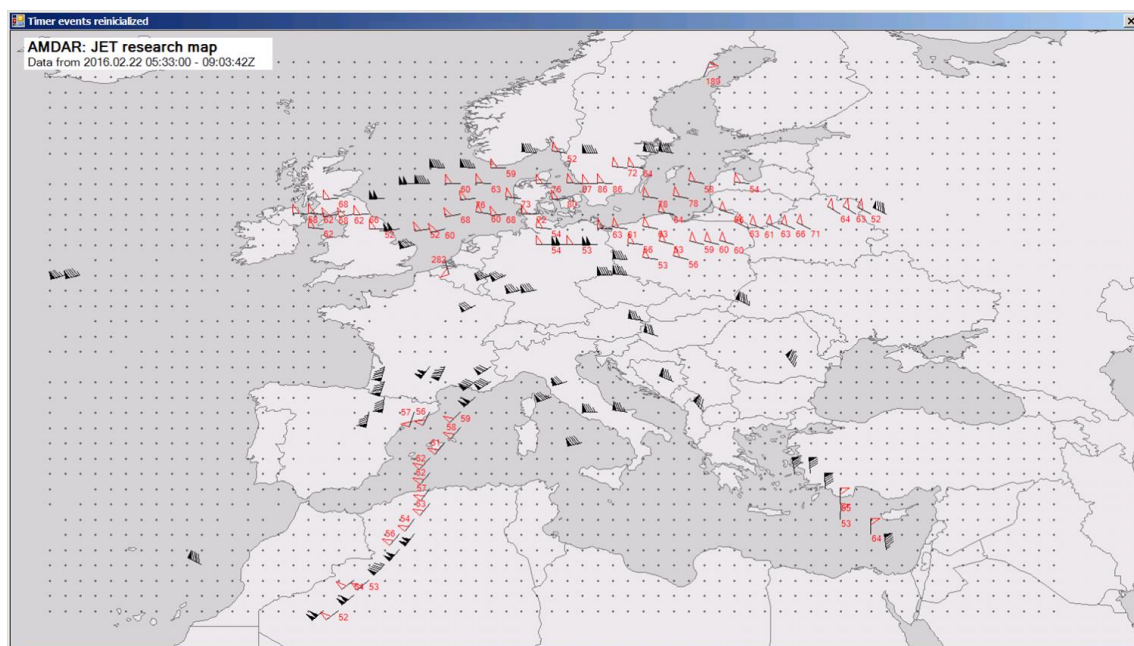
Ezzel az alsóbb rétegekben található inverzió a reggeli órákra mintegy 10 °C-os lett. A 5. ábra ezt az állapotot szemlélteti a 07:49Z-kor felszálló repülőgép által mért vertikális profiljain. Ezen jól látszik a vastag inverziós réteg és a felette markánsan erősödő nyugatias szél. A hőmérsékleti grafikonon látható pontok az egyedi méréseket mutatják, amin jól észrevehető, hogy az

AMDAR mérések előírásainak megfelelően hogyan változik a mérési gyakoriság a magasság függvényében.



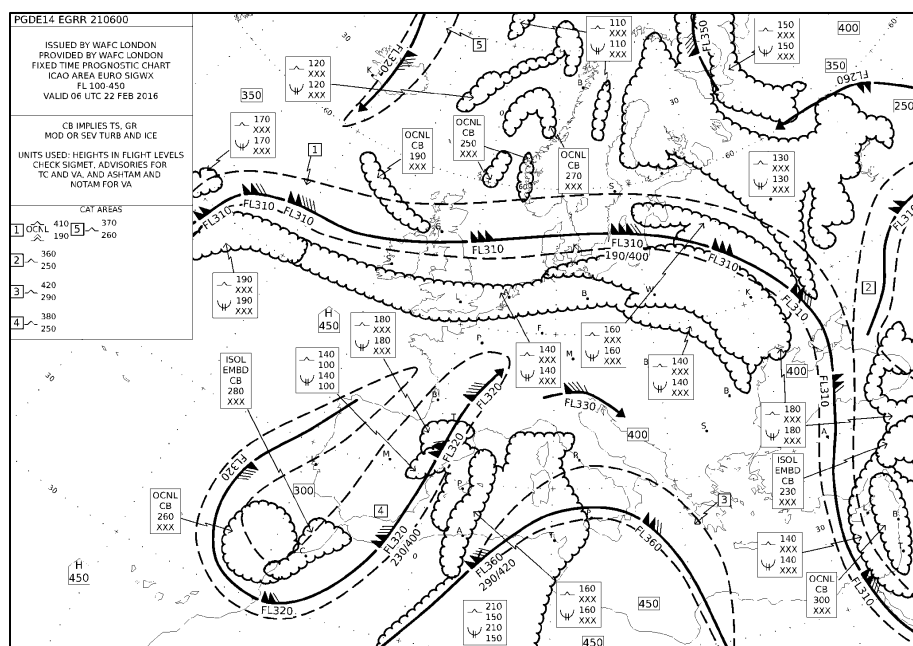
5. ábra. AMDAR mérési adatok alapján előállított budapesti vertikális hőmérsékleti (°C) és szélprofil (m/s) a nyomási magasság (m) függvényében 2016. február 22-én 07:49Z-kor

Kísérleti jelleggel a FL100 feletti széladatokat figyelembe vételével előállítottunk egy jet térképet is, amelyet a 6. ábra szemléltet. Ennek előállításához a széladatokat a mérés helyének földrajzi koordinátái alapján rácsponti hálózathoz rendeltük, majd az adott vertikális oszlopban kiválasztottuk a maximális szélességet elérő mérési adatot. Ezt követően megvizsgáltuk, hogy az adott rácspontban a szél erősségének lokális maximuma van-e a szél irányára merőlegesen található legközelebbi rácspontokat figyelembe véve. Ennek kiszámításához az adott rácspont körüli kört nyolc egyenlő részre osztottuk, amelyek középvonalát a fő- és mellékégtájak iránya határozta meg. A vizsgált rácspontokat az alapján választottuk ki, hogy a szélirány melyik középvonalhoz esik legközelebb. Ez a vizsgálat azt igyekszik szimulálni, hogy a jetben a szélesség a jet tengelyében a legnagyobb, a gradiense pedig a szélirányra merőlegesen maximális. A térképi megjelenítés esetén három különböző jelölést alkalmaztunk. Amennyiben az adott rácspontban nem volt elérhető széladat a vizsgált magasságokból, akkor a rácspontot mutató koordinátákat egy ponttal jelöltük. Ha volt széladat, de az nem teljesítette a jet kritériumait illetve a lokális maximumra vonatkozó előírást, akkor nem alkalmaztunk jelölést. Ez a térképen üres területként látszik, ami azt jelenti, hogy van adatunk, de nincs jet a térségben. Amennyiben a rendelkezésre álló adatok minden feltételnek megfelelték, akkor az jet jelenlétére utal, amit a szokásos szélzászlókkal jelöltünk. Ez alól csak az 50 m/s-ot meghaladó szélerősségek képeztek kivételt, amelyek piros színnel és a szélesség numerikus értékével vannak jelölve. Ahogyan a 6. ábrán is látható, a közép-európai térség adatsűrűsége jónak mondható, a terület nagy részére elérhető információ.



6. ábra Az ábrán jelölt időszakra vonatkozó, AMDAR mérésekből előállított jet térkép

A 6. és 7. ábra összevetése után megállapítható, hogy a jetek elhelyezkedése nagyon hasonló képet mutat. Érdeemes először a Brit-szigetektől a Skandináv-félsziget déli részén át, a Kelet-európai-síkság nyugati felén húzódó jetre tekinteni. Ennek a jetnek a helyzete, iránya valamint a maximális szélessége is jó egyezést mutat a két térképen. Az előrejelzés 85 m/s-os szélmaximumot jelez, amit a repülőgépes méréssel mért 87 m/s tökéletesen igazol. Az AMDAR jet térképen ebben a térségben egy viszonylag széles sávban jelenik meg a jet, ami teljesen egybeesik a szignifikáns térképen jelölt turbulens zóna területével. Az adathiányos területeket figyelmen kívül hagyva a fentiek mellett a Földközi-tenger keleti és nyugati medencéje felett húzódó futóáramlások mind helyzetüket, mind pedig erősségüket tekintve helyesen jelennek meg a térképen.



7. ábra Az európai térségre 2016. február 22-én 06Z-re kiadott előrejelzett szignifikáns magassági térkép

Ez egyrészt dicséri a szignifikáns térkép készítőinek munkáját, amely esetében ne feledkezzünk meg arról a tényről, hogy előrejelzési produktumról van szó. Másrészt arra enged következtetni, hogy a kísérleti jelleggel előállított jet térkép a korlátait figyelembe véve az operatív munkában is életképes lehet.

Az esettanulmányok mellett azt is megvizsgáltuk, hogy a rendelkezésre álló SODAR/RASS adatok, és az ezzel egy időben és helyen végzett AMDAR mérések adatai mennyire egyeznek. Ebben a vizsgálatban több nehézséggel is szembesültünk. Az AMDAR mérések magassági adatai standard 1013,25 hPa-os magassági adatok formájában álltak rendelkezésre, amelyet át kellett konvertálni az aktuális QNH légnyomás alapján valós idejű felszín feletti (AGL) magasságra. Ehhez szerencsére rendelkezésre álltak az LHBP⁶ QNH nyomási adatai. A második nehézséget az okozta, hogy az AMDAR mérések, és a SODAR mérések magasságai, illetve pontos mérési időpontjai sem egyeztek meg, hiszen AMDAR mérések a repülőgépek le- és felszállásához kapcsolódóan történtek, meg a SODAR/RASS mérések 15 percenkénti ütemezésben folytak. Ezért azzal a közelítéssel éltünk, hogy magasságban a legközelebbi SODAR/RASS mérési szinten vizsgáltuk, időpontban pedig az AMDAR mérést követő első SODAR/RASS mérést vettük figyelembe.

A vizsgálatunk tárgyát a 2016. február 19 és március 15 közötti időszak képezte. Ebben az időszakban 1307 db olyan AMDAR mérési adatunk volt, amely 1000 m alatti, és a budapesti repülőtérrel indult, vagy oda érkezett járatról származott. Ehhez 639 db SODAR mérési adatot, és 626 db RASS mérési adatot tudtunk párosítani, miután nem minden mérési pontban képes a SODAR/RASS berendezés a névleges mérési magasságot elérni (ld. 3. táblázat). Az értékeléskor szisztematikus hibát (BIAS) és négyzetes hibát vizsgáltunk, valamint a szélirány adatok esetében a széliránykülönbség koszinusz értékét vizsgáltuk (1 érték teljes egyezést, 0 érték 90 fokos eltérést, -1 érték 180 fokos különbséget jelent). Az eredményeket az 5. táblázatban foglaltuk össze. A vizsgálat azt mutatta, hogy az átlagos négyzetes hiba a hőmérséklet esetében 1 fok alatti, míg szél esetében 1,7 m/s. A szisztematikus hiba értékelése alapján az látszik, hogy a SODAR/RASS adatok értékei szisztematikusabban magasabbak, mint az AMDAR mérések adatai. A hőmérsékletnél alkalmazott közelítés (a virtuális hőmérsékletről való átszámítás) miatt azonban ez a hiba valószínűleg nagyobb lehet, hiszen száraz légtömeg esetén a RASS szoftvere alábecsüli a hőmérsékleti értéket. A szélirány esetében azonban várakozás feletti az adatok egyezése, mert a 0,97-es koszinusz érték csupán 12 fokos átlagos eltérésnek felel meg.

Hőmérséklet RMSE ⁷	Hőmérséklet BIAS ⁸	Szélsebesség RMSE	Szélsebesség BIAS	Szélirány cos értéke
0,97	-0,76	1,7	-0,43	0,97

5. táblázat Az AMDAR és a SODAR/RASS mérési adatok összehasonlítása

ÖSSZEFOGLALÁS

Cikkünkben a repülőgépes AMDAR mérések általános ismertetése mellett azok lehetséges felhasználási területeit mutattuk be. A hazai gyakorlatban ugyanis ezen adatok felhasználása az

⁶ Budapest Liszt Ferenc nemzetközi repülőtér négy betűs ICAO kódja

⁷ RMSE – Root Mean Square Error, átlagos négyzetes hiba négyzetgyöke

⁸ BIAS – Az eltérés előjeles átlaga, a szisztematikus hiba mértéke

adatasszimilációs alkalmazásokra korlátozódik, annak ellenére, hogy számos nemzetközi példa és szakirodalmi hivatkozás igazolja hasznosságukat az előrejelzési munka számos területén. A Geoinformációs Szolgálatnál létrehozott program segítségével esettanulmányokhoz kapcsolódó példákon mutattuk meg az AMDAR adatok megjelenítésének lehetséges formáit. Az adatbázisba rendezett mérési adatokat a SODAR/RASS mérések adataival vetettük össze, ami alátámasztotta azt a feltevésünket, hogy ezek az adatok alkalmasak lehetnek az operatív munkában való használatra. Figyelembe véve az AMDAR mérések korlátait és hiányosságait, összességében kijelenthető, hogy a mérési eredmények a hagyományos szondázási adatokkal és esetleg modern távérzékelési adatokkal kiegészülve jelentős segítséget jelenthetnek bizonyos előrejelzési feladatok esetén.

Kutatási, fejlesztési terveink között szerepel a jelen keretek között is bemutatott összehasonlító elemzések hosszabb időszakokra való megismétlése és a kinyert adatok vizualizációjának továbbfejlesztése a felhasználói visszajelzések alapján.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] BOTTYÁN Z, ZÉNÓ ANDRÁS GYÖNGYÖSI, WANTUCH F, TUBA Z, KURUNCZI R, KARDOS P, ISTENES Z, WEIDINGER T, HADOBÁCS K, SZABÓ Z, BALCZÓ M, VARGA Á, BÍRÓNÉ KIRCSI A, HORVÁTH GY. Measuring and Modeling of Hazardous Weather Phenomena to Aviation Using the Hungarian Unmanned Meteorological Aircraft System (HUMAS). *Időjárás / Quarterly Journal Of The Hungarian Meteorological Service* 119:(3) pp. 307-335. 2015
- [2] BOTTYÁN Z, WANTUCH F, GYÖNGYÖSI Z, TUBA Z, HADOBÁCS K, KARDOS P, KURUNCZI R. Development of a Complex Meteorological Support System for UAVs. *World Academy Of Science Engineering And Technology* 7:(4) pp. 646-651. 2013
- [3] PAINTING JD – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION AMDAR reference manual. Technical Report WMO No. 958. 2003
- [4] STICKLAND J, WMO AMDAR PANEL The global AMDAR system. Third WMO workshop on the impact of various observing system on NWP, Alpach, 2004
- [5] CARDINALI C, ISAKSEN L, ANDERSSON E. Use and Impact of Automated Aircraft Data in a Global 4DVAR Data Assimilation System. *Monthly Weather Review* Vol. 131.8 pp. 1865-1877, 2003
- [6] RAWLINS F, BALLARD SP, BOVIS KJ, CLAYTON AM, LI D, INVERARITY GW, PAYNE TJ et al. The Met Office global four-dimensional variational data assimilation scheme. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133.623 pp. 347-362, 2007
- [7] RANDRIAMAMPINANINA R Távértékelt és repülőgépes megfigyelések alkalmazása a korlátos tartományú ALADIN/HU numerikus időjárás előrejelző modellben. OTKA zárójelentés, nyilvántartási szám: T049579, 2010 http://real.mtak.hu/11642/1/49579_ZJ1.pdf
- [8] BALOGH MIKLÓS Repülőgépes mérések felhasználása az ALADIN számszerű időjárás-előrejelzési modellben. *Légkör*, 51.3, pp. 24-26, 2006
- [9] KURIMSKI PG, BRUSKY ES Applications of aircraft sounding data in short-term convective forecasting. 23rd Conference on Severe Local Storms, St. Louis, MO, American Meteorological Society, 2006
- [10] DRUSE CM Evaluating the benefits of TAMDAR data in aviation forecasting. 11th Symposium on IOAS-AOLS, San Antonio, TX, American Meteorological Society, 2007
- [11] MONINGER WR, MAMROSH RD, PAULEY PM Automated meteorological reports from commercial aircraft. *Bulletin of American Meteorological Society* 84, 203-216. 2003
- [12] MONINGER WR, BENJAMIN SG, DÉVÉNYI D, JAMISON BD, SCHWARTZ BE, SMITH TL, SZOKE E AMDAR Optimization Studies at the Earth System Research Laboratory / Global Systems Division. 10th Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS), Atlanta, GA, 2006

EXAMINATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN MACROSYNOPTIC PATTERNS AND ANALOG
FORECASTING OF AVIATION METEOROLOGY

The majority of forecast products of aviation meteorology have ultra-short or short time validity. The typical refresh period of traditional numerical weather prediction (NWP) models applied in aviation meteorological support is 6 to 12 hours. This fact valorizes the role of observational data from the internal periods. This is especially true in case of upper air measurements due to their emphasized importance in aviation meteorology. Unfortunately, routine radiosonde measurements are not adjusted to users' needs neither spatially nor in time. Application of automated weather reports from Aircraft Meteorological Data Relay system (AMDAR) may benefit because of the reasons above. In this paper we examined the utilization of these types of data. In parallel, we verified the accuracy and reliability of AMDAR information by the mean of comparison of acoustic radar (SODAR) data. Considering the difficulties of the measuring procedures, we can declare that the application of this information can be an efficient tool in the process of producing and verifying aviation meteorology forecasts.

Keywords: aviation meteorology, AMDAR, SODAR/RASS, forecasting

TUBA Zoltán doktori hallgató Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola; meteorológus főtitest Magyar Honvédség Geoinformációs Szolgálat Meteorológiai Támogató Osztály tuba.zoltan@mil.hu; tubazoltan.met@gmail.com orcid.org/0000-0002-0345-5292	TUBA Zoltán doctoral student National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Doctoral School of Military Engineering; senior meteorological officer Hungarian Defence Forces Geoinformation Service Meteorological Support Department tuba.zoltan@mil.hu; tubazoltan.met@gmail.com orcid.org/0000-0002-0345-5292
KARDOS Péter részlegvezető Hungarocontrol Magyar Légiforgalmi Szolgálat Zrt. Repülőtéri Meteorológiai Részleg Peter.Kardos@hungarocontrol.hu orcid.org/0000-0001-8857-4102	KARDOS Péter head of unit Hungarocontrol Hungarian Air Navigation Services Ltd. Aerodrome Meteorological Unit Peter.Kardos@hungarocontrol.hu orcid.org/0000-0001-8857-4102
SZABÓ Péter osztályvezető Magyar Honvédség Geoinformációs Szolgálat Meteorológiai Támogató Osztály peter.szabo@mhtehi.gov.hu orcid.org/0000-0002-9593-5356	SZABÓ Péter head of department Hungarian Defence Forces Geoinformation Service Meteorological Support Department peter.szabo@mhtehi.gov.hu orcid.org/0000-0002-9593-5356



http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2016_2/2016-2-11-0327_Tuba_Zoltan_et_al.pdf